

不同水分与腐植酸处理对裸燕麦 生理特性和产量形成的影响

赵宝平, 韩文元, 孙雯, 武俊英, 刘景辉

(内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要:在防雨棚盆栽条件下,以‘内燕5号’裸燕麦为材料,在水分胁迫(45%田间持水量(FWC))和正常供水(75%FWC)处理下,于拔节期、抽穗期和灌浆期叶面喷施腐植酸(HA)和清水(WT),测定裸燕麦植株形态、叶片抗逆生理指标、产量及其构成因素等,明确不同生育时期喷施腐植酸对裸燕麦抗旱性影响及其产量形成差异。结果表明,与喷施WT处理相比,45%FWC处理下喷施HA叶片叶绿素相对含量(SPAD)在拔节期、抽穗期和灌浆期分别提高16.7%、7.0%和15.1%,过氧化物酶活性分别提高14.1%、16.7%和6.3%,丙二醛含量分别下降20.3%、11.2%和7.8%($P<0.05$);喷施HA叶片脯氨酸含量均上升,且45%FWC显著高于75%FWC处理,在抽穗期达到最大。45%FWC处理下,拔节期喷施HA植株小穗数显著增加,抽穗期喷施HA穗粒数和千粒重显著增加,且单株籽粒重增加幅度均超过10%($P<0.05$);75%FWC处理下,喷施HA后植株单穗粒数显著增加,且单株籽粒重在抽穗期增幅最大。试验表明在拔节和抽穗期水分胁迫下喷施HA可显著改善叶片光合能力、提高抗氧化酶活性和渗透调节能力,进而促进籽粒生长发育并提高产量。建议水分胁迫条件下在拔节期和抽穗期喷施HA,正常水分条件下在抽穗期喷施HA。

关键词:裸燕麦;水分胁迫;腐植酸;生理特性;产量形成

中图分类号:S512.6 文献标志码:A

Effect of water stress and foliar-applied humic acid on physiological properties and yield formation of naked oats

ZHAO Baoping, HAN Wenyuan, SUN Wen, WU Junying, LIU Jinghui

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: Under the condition of rain-proof shelter and using naked oats ‘Neiyan 5’ as material, we conducted a pot cultivated experiment to test the effects of different water treatments (45% and 75% of field water capacity, FWC), and foliar-applied humic acid (HA) and water (WT) at jointing, heading and grain-filling stages on plant leaf morphological, physiological indices and grain yield components. The research was to clarify which growth stages is suitable for applying HA based on drought resistance and yield improvement, and to provide a theory on oats high-yielding and drought-resistant cultivation. The results showed that under 45% of FWC and foliar-applied HA, the relative chlorophyll content (SPAD) in leaves was 16.7%, 7.0%, and 15.1% higher than that of WT treatment at jointing, heading and grain-filling stage, respectively; the POD activity was 14.1%, 16.7%, and 6.3% higher than that of WT treatment, and the MDA content was 20.3%, 11.2%, and 7.8% lower than that of WT treatment, respectively ($P<0.05$). Under 45% and 75% of FWC, the proline content (Pro) both increased when spraying HA; the value under 45% of FWC was significantly higher than that of 75% of FWC, and reached the maximum at heading stage. Under 45% of FWC, the number of spikelet per panicle was increased significantly when spraying HA at jointing stage, while the grain number per panicle and 1000-grain weight significantly increased when spr-

收稿日期:2019-09-19

修回日期:2020-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(31560373);现代农业产业技术体系专项资金(CARS-07);内蒙古自然科学基金项目(2016MS0312)

作者简介:赵宝平(1982-),男,内蒙古察右后旗人,博士,副教授,研究方向为燕麦水分生理生态。E-mail:zhaobaoping82@163.com

通信作者:刘景辉(1965-),男,内蒙古奈曼旗人,教授,博士研究生导师,主要从事旱作区耕作制度与农业生态系统研究。E-mail:cauljh@

ying HA at heading stage, and the grain weight increased by more than 10% ($P < 0.05$). Under 75% of FWC, the grain number per panicle increased significantly, and the grain weight increased most at heading stage. In summary, under water stress, spraying HA at the jointing and heading stages could significantly improve photosynthetic capacity, enhance antioxidant enzyme activity and osmotic regulation ability, thus promoting grain development and improving yield. In practice, it is recommended that spraying HA at the jointing and heading stages under drought conditions, and at the heading stage under sufficient water conditions.

Keywords: naked oat; water stress; humic acid; drought resistance; yield formation

干旱是影响作物正常生长发育继而造成产量降低的主要因素之一^[1-2]。裸燕麦 (*Avena sativa* L.), 俗称莜麦, 是我国北方高寒冷凉地区重要的优势特色作物, 由于其营养价值独特, 受到了越来越多的关注和重视, 其市场需求量也呈不断增长趋势^[3]。裸燕麦主要种植在我国北方干旱半干旱地区, 生育期间干旱缺水是导致其低产的主要原因^[4]。因此, 在水分胁迫下开展不同调控措施对裸燕麦籽粒产量形成的影响及其生理机制研究具有重要的理论和实践意义。

腐植酸主要由黄腐酸、棕腐酸和黑腐酸组成。大量研究表明, 叶面喷施腐植酸水溶肥料 (HA) 具有促进作物生长, 增加作物产量的作用^[5-7]。腐植酸主要通过影响碳、氮代谢过程来促进大量和微量元素吸收和作物生长^[8]。Abdelaal 等^[9]发现腐植酸肥料可显著提高水分胁迫下大麦光合能力、促进植株生长及提高产量。赵海燕等^[10]在小麦抽穗期和齐穗期喷施 HA, 小麦产量和品质均提高。此外 HA 还具有提高作物抗逆性的作用; 喷施 HA 可增加植株叶绿素含量、养分含量和抗氧化酶活性, 从而增强玉米耐盐性^[11]。水分胁迫下, HA 通过增加油菜叶片气体交换速率和电子传递量而改善了光合能力^[12]。重度水分胁迫下喷施 HA 可调控燕麦叶片糖组分和内源激素从而缓解胁迫伤害^[13]。以上研究表明 HA 具有改善作物抗旱性和提高产量的作用, 然而在不同生育时期水分胁迫处理和喷施 HA 如何影响燕麦产量形成以及处理间抗旱性差异尚不明确。本研究拟开展拔节、抽穗和灌浆等 3 个生育时期不同水分胁迫和喷施腐植酸水溶肥处理对燕麦抗旱增产生理机制研究, 为腐植酸肥料在燕麦等作物上推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为内蒙古自治区农牧业科学院育成的裸燕麦品种‘内燕 5 号’, 该品种适宜在水浇地或

水分条件好的滩地种植, 具有较高增产潜力, 生育期 90 d 左右。

叶面喷施腐植酸为内蒙古永业农丰生物技术有限责任公司生产的腐植酸水溶性肥料, 其中水溶性腐植酸含量 $\geq 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 氮磷钾总含量 $\geq 200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 微量元素 (硼、锰、钼、锌等) $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本试验于 2015 年 4—8 月在内蒙古呼和浩特市科技园艺示范中心的防雨棚内进行。试验采用盆栽种植, 盆栽土壤为沙壤土, 田间持水量为 16%。试验选择规格为高 30 cm, 直径 27 cm 的塑料盆, 每盆装取自大田耕作层的土壤 11 kg (干土重), 分别施磷酸二铵 (含 N 18%, P_2O_5 46%) 3 g, 尿素 2 g (含 N 46%) 作为底肥, 此后不再追肥。每盆均放通气管, 以便于生长后期根系生长呼吸。播种前统一浇水 1.5 L, 然后均匀播种, 并覆土 1 cm。每盆播种燕麦 50 株, 在三叶期定株到 25 株。水分处理开始前和结束后维持充分供水直至成熟。

试验设 3 个因素, 分别为 3 个处理时期, 2 个水分梯度处理和 2 个喷施处理, 共 12 个处理, 重复 4 次, 共 48 盆, 在防雨棚内随机区组放置。3 个处理时期分别为拔节期 (播种后 42 d)、抽穗期 (播种后 54 d) 和灌浆期 (播种后 66 d)。2 个水分梯度分别为水分胁迫 (45% 田间持水量 (FWC)) 和正常供水 (75% FWC), 分别在各盆 50% 以上植株进入各物候期时开始实施 7 d 水分处理, 处理结束之后恢复充分供水 ($\geq 75\%$ FWC); 采用称重差值法将土壤水分分别控制在 50% ~ 40% 和 80% ~ 70% 田间持水量范围内, 每次称的盆重与预计达到设置水分梯度需要灌水量之间的差值为需要补充的水量。2 个喷施处理在水分处理开始当天实施, 分别为稀释 500 倍的腐植酸水溶肥料 (HA) 和等量清水 (WT), 以保证和处理喷水量一致, 每次喷施量为 50 ml, 手持喷雾器均匀喷施于燕麦叶片及植株表面, 具体试验设置及处理方法见表 1。

表 1 试验处理设置方案
Table 1 Experimental setting scheme

因素 Experimental factor	处理 Treatment	处理代码 Treatment code	试验设计 Experiment design
处理时期 Treatment stage	拔节期 Jointing	J	播种后 42 d 实施处理 Treatments were carried out 42 days after sowing
	抽穗期 Heading	H	播种后 54 d 实施处理 Treatments were carried out 54 days after sowing
	灌浆期 Grain-filling	G	播种后 66 d 实施处理 Treatments were carried out 66 days after sowing
水分处理 Water treatment	水分胁迫 Water stress	45%FWC	田间持水量为 45%水分处理 7 d The 45% field water capacity was treated for 7 days
	正常供水 Normal water supply	75% FWC	田间持水量为 75%水分处理 7 d The 75% field water capacity was treated for 7 days
喷施处理 Spraying treatment	清水 Water	WT	水分处理第 1 天喷施 50 ml 清水 50 ml water was foliar-applied on the first day of water treatment
	腐植酸 Humic acid foliar fertilizer	HA	水分处理第 1 天喷施 50ml 腐植酸水溶肥料 50 ml humic acid foliar fertilizer was foliar-applied on the first day of water treatment

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标 在各时期处理结束后第 2 天,每盆取样 5 株,测定株高和单株叶面积。叶面积采用长宽系数法测定,即叶面积 = 叶片长度 × 宽度 × 叶面积系数(0.63)。

1.3.2 生理指标 在各次处理结束后第 2 天,每盆随机选 10 株燕麦,选择植株最上部展开叶或旗叶,采用手持式叶绿素仪 (SPAD-502) 测定叶片叶绿素含量相对值 (SPAD)。

在各生育时期水分和喷施处理结束后第 2 天,取各处理完整植株 5 株,装入冰袋保温箱带回内蒙古农业大学燕麦产业研究中心实验室,将叶片分离后于冰箱中保存,参照高俊凤^[14]的方法测定各生理指标。超氧化物歧化酶活性 (SOD) 采用氮蓝四唑荧光比色法,过氧化物酶含量 (POD) 采用紫外分光光度计测定;丙二醛含量 (MDA) 采用硫代巴比妥酸比色法测定,游离脯氨酸含量 (Pro) 采用磺基水杨酸法测定。

1.3.3 产量和产量构成因素 燕麦成熟后,将每盆中剩余燕麦植株全部收获,在实验室进行考种。考种指标包括穗长、单株小穗数、单穗粒数、千粒重和单株籽粒重等。

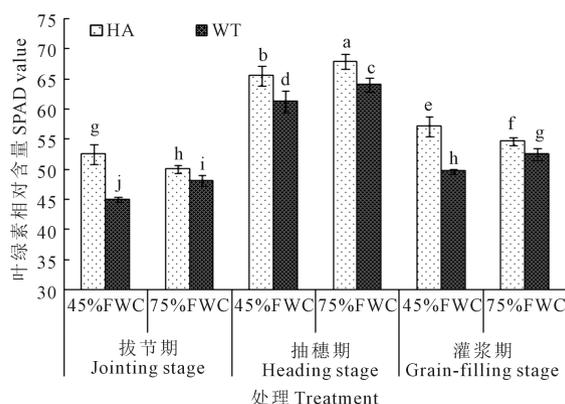
1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行试验数据的统计和作图,采用 SAS 8.2 软件进行试验数据方差分析和相关性分析,差异显著性分析采用最小差异显著性 (LSD) 在 0.05 水平检验。

2 结果与分析

2.1 叶绿素相对含量

叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值) 在一定程度上



注:图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters in each column indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同水分胁迫和腐植酸处理对燕麦叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值) 的影响

Fig.1 Effect of water stress and humic acid foliar fertilizer on the SPAD readings of oat leaves

能反映植株生长旺盛程度和发育状况。抽穗期各处理的 SPAD 值均达到最大值。不同水分处理对 SPAD 值的影响在各生育时期表现不一致,在拔节期和灌浆期,喷施 HA 表现为 45% FWC > 75% FWC, 喷施 WT 处理表现为 75% FWC > 45% FWC (图 1, $P < 0.05$); 在抽穗期,喷施 HA 处理下 2 个水分处理间差异不显著。水分胁迫处理下 (45% FWC), 在拔节期、抽穗期和灌浆期喷施 HA 分别较 WT 处理高出 16.7%、7.0% 和 15.1% ($P < 0.05$); 在正常供水下 (75% FWC), 在拔节期、抽穗期和灌浆期喷施 HA 分别较 WT 高出 4.0%、6.1% 和 4.1%。不同水分、喷施 HA 处理在各处理时期对叶片 SPAD 值影响显著 (表 2)。

表 2 不同处理燕麦生理指标的差异显著性和变异系数

Table 2 Difference significance and coefficient of variation for physiological indexes in oat under different treatments

处理 Treatment	叶绿素相对含量 SPAD value	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	过氧化物酶活性 POD activity	丙二醛含量 Malondialdehyde content	脯氨酸含量 Proline content	单株叶面积 Leaf area per plant
水分 Water (W)	***	***	***	***	***	***
喷施 Spraying(S)	***	***	***	***	***	***
处理时期 Treatment stage (T)	***	**	***	***	***	***
W×S	***	***	*	***	***	***
W×T	***	**	***	*	***	ns
S×T	ns	ns	ns	**	ns	***
W×S×T	***	***	*	ns	***	***
CV/%	1.20	0.99	3.15	2.42	1.21	2.00
Pr>F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

注: *, **, ***, ns 表示各处理差异显著性水平分别为 $0.01 < P < 0.05$, $0.001 < P < 0.01$, $P < 0.001$ 及差异不显著。下同。

Note: *, **, ***, and ns indicate the significant level of each treatment as $0.01 < P < 0.05$, $0.001 < P < 0.01$, $P < 0.001$, and not significant. The same below.

2.2 抗氧化酶活性

植物抗氧化酶活性的大小与植物对逆境适应能力有关。不同生育时期超氧化物歧化酶(SOD)活性整体表现为,水分胁迫下(45% FWC)在抽穗期达到最大,正常供水下随着生育进程呈不断增加趋势(图 2A)。不同水分处理下,在拔节期和抽穗期,燕麦叶片 SOD 活性均表现为 45% FWC > 75% FWC ($P < 0.05$),在灌浆期两个水分处理间差异不显著(图 2A);在拔节期正常供水条件下,喷施 HA 处理 SOD 值较 WT 高 18.5% ($P < 0.05$),其它各生育时期在同一水分处理下喷施 HA 后叶片 SOD 值均升高,但与喷施 WT 处理差异不显著。

各处理的叶片过氧化物酶(POD)活性均随着生育进程推进呈不断增长趋势(图 2B)。在拔节期和抽穗期不同水分处理下,燕麦叶片 POD 活性在各生育时期均表现为 45% FWC > 75% FWC ($P < 0.05$),在抽穗期,水分胁迫比正常供水处理的 POD 活性高 25.4%~49.2%;水分胁迫下,喷施 HA 处理的 POD 活性在各生育时期分别较 WT 处理高 14.1%、16.7% 和 6.3% ($P < 0.05$)。水分胁迫、喷施 HA 及不同时期处理对燕麦叶片抗氧化酶活性影响显著(表 2)。

2.3 叶片丙二醛含量

植物丙二醛(MDA)的积累与其叶片质膜体系受损程度有关。本试验中水分、喷施 HA 及不同时期处理对燕麦叶片 MDA 含量影响显著(表 2)。各水分处理的 MDA 含量均随着生育进程推进不断增长,在灌浆期达到最大,且各生育时期之间差异显著($P < 0.05$,图 3)。不同水分处理下,各生育时期燕麦叶片的 MDA 含量均为 45% FWC > 75% FWC ($P < 0.05$),在拔节期 45% FWC 比 75% FWC 处理高

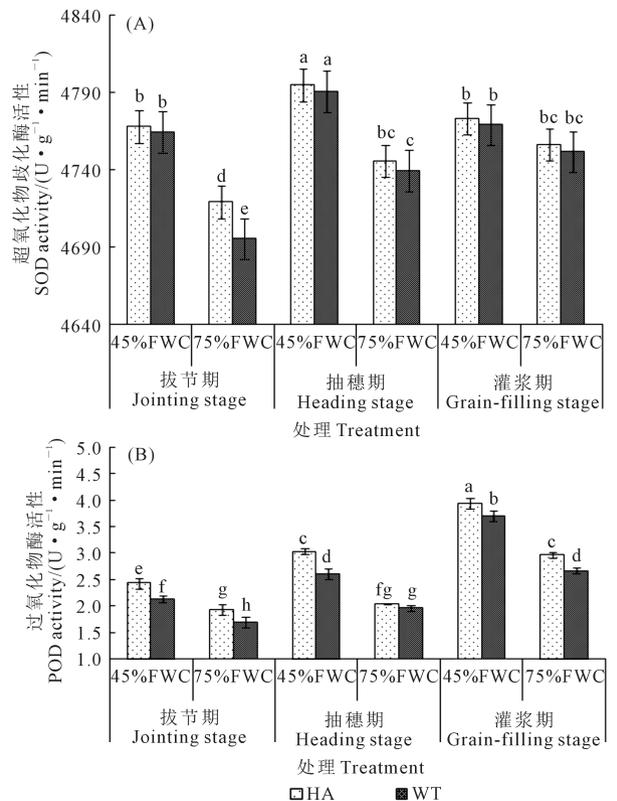


图 2 不同水分胁迫和腐植酸处理对燕麦叶片抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effect of water stress and humic acid foliar fertilizer on antioxidant enzyme activity of oat leaves

22.4%~25.7%。喷施 HA 可显著降低 MDA 含量,在拔节期、抽穗期和灌浆期水分胁迫下喷施 HA,MDA 含量分别较 WT 降低 20.3%、11.2% 和 7.8%;而正常供水下,喷施 HA 的 MDA 含量较 WT 处理分别降低 18.2%、1.1% 和 4.7%。

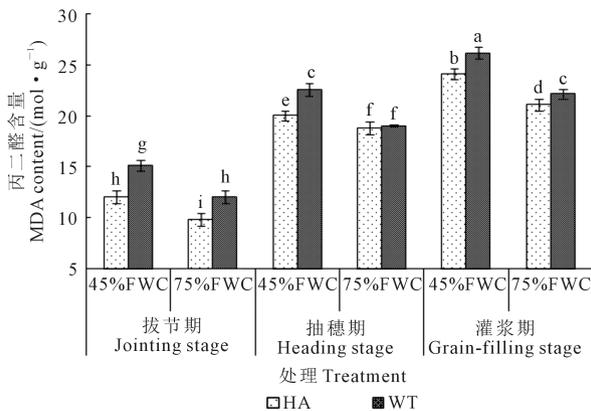


图 3 不同水分胁迫和腐植酸处理对燕麦叶片丙二醛含量的影响

Fig.3 Effects of water stress and humic acid foliar fertilizer on the content of MDA in oat leaves

2.4 叶片游离脯氨酸含量

植物体内游离脯氨酸含量(Pro)能反映植物的渗透调节能力。本试验中水分、喷施处理及不同时期处理对燕麦叶片 Pro 含量影响显著(表 2)。叶片游离脯氨酸含量随着生育时期推进先升高后降低,在抽穗期达到最大,且各生育时期之间差异显著($P < 0.05$,图 4)。水分胁迫下 Pro 含量在拔节期、抽穗期和灌浆期分别较正常供水处理提高 48.7%~52.4%、11.6%~19.2%和 2.2%~7.1%($P < 0.05$)。喷施 HA 对叶片 Pro 含量的影响显著,水分胁迫处理下喷施 HA,在拔节期、抽穗期和灌浆期 Pro 含量分别较 WT 提高 8.0%、2.7%和 3.7%;正常供水处理下喷施 HA 处理,Pro 含量分别较 WT 提高 10.7%、9.7%和 11.0%($P < 0.05$)。

2.5 单株叶面积

水分、喷施处理和不同处理时期对燕麦单株叶面积影响显著(表 2)。45% FWC 处理单株叶面积在拔节期、抽穗期和灌浆期的分别较 75% FWC 下降 19.4%~31.4%、8.1%~17.3%和 7.1%~14.2%(图 5)。喷施 HA 对单株叶面积的影响显著,45% FWC 处理下喷施 HA,在拔节期、抽穗期和灌浆期,燕麦单株叶面积分别较喷施 WT 处理提高 21.6%、15.4%和 12.7%;75% FWC 处理下喷施 HA,燕麦单株叶面积分别较喷施 WT 提高 3.5%、3.8%和 4.1%。

2.6 产量及产量构成因素

各生育时期水分胁迫可影响植株生长,而喷施 HA 对株高影响不显著(表 3)。在拔节期、抽穗期和灌浆期 45% FWC 处理下燕麦株高分别较正常供水处理平均降低 8.6%、15.1%和 3.4%。水分胁迫下燕麦穗长均显著下降,45% FWC 处理下,抽穗期喷施 HA 能促进穗长伸长,较喷施 WT 提高 8.5%;在

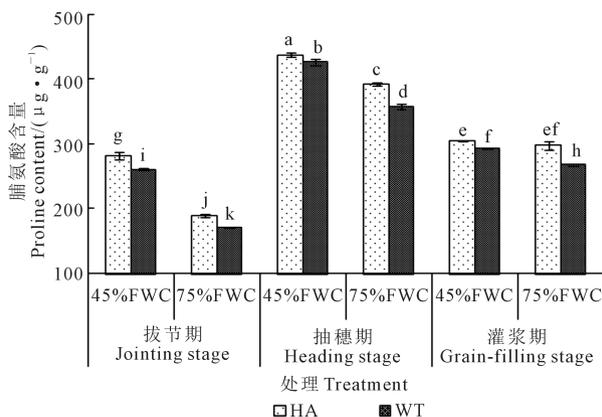


图 4 不同水分胁迫和腐植酸处理对燕麦叶片游离脯氨酸含量的影响

Fig.4 Effects of water stress and humic acid foliar fertilizer on free proline content in oat leaves

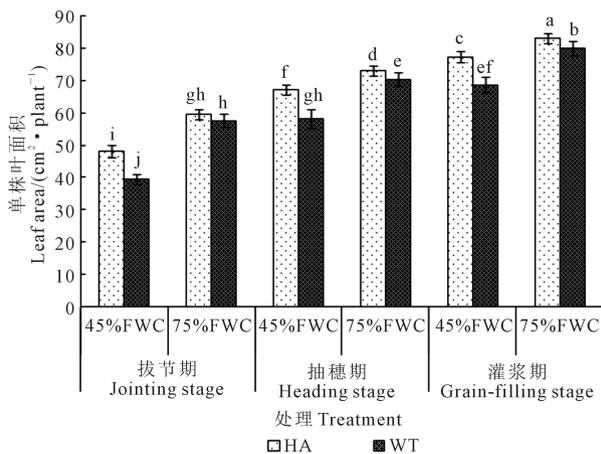


图 5 不同水分胁迫和腐植酸处理对燕麦单株叶面积的影响

Fig.5 Effects of water stress and humic acid foliar fertilizer on leaf area in oat leaves

75% FWC 处理下,拔节期喷施 HA 穗长较 WT 处理提高 7.6% ($P < 0.05$)。

水分胁迫下燕麦单株小穗数与正常供水处理相比显著下降,抽穗期 45% FWC 处理小穗数下降 25.2%,降幅最大($P < 0.05$);喷施 HA 可不同程度增加单株小穗数,45% FWC 和 75% FWC 处理下,喷施 HA 分别较 WT 增加 13.3%~37.0%和 2.9%~5.5%,其中在拔节期增幅最大($P < 0.05$)。45% FWC 处理下燕麦单穗粒数显著下降,较 75% FWC 处理平均降幅为 31.5% ($P < 0.05$)。喷施 HA 可增加单株穗粒数,45% FWC 和 75% FWC 处理下较 WT 处理增幅分别为 9.9%~16.1%和 12.8%~26.6% ($P < 0.05$),均在抽穗期增幅最大(表 3)。

水分胁迫下燕麦籽粒千粒重显著下降,较 75% FWC 处理平均降幅为 13.1% ($P < 0.05$)。喷施 HA 对燕麦籽粒千粒重影响显著,45% FWC 处理下,在拔

表 3 不同水分胁迫和腐植酸处理对燕麦产量及产量构成因素的影响

Table 3 Effect of water stress and humic acid foliar fertilizer on grain yield and yield components in oat

处理时期 Treatment stage	水分处理 Water treatment	喷施处理 Spraying treatment	株高 Plant height/cm	穗长 Panicle height/cm	单株小穗数 Spikelet number per plant	单穗粒数 Grain number per ear	千粒重/g Thousand kernel weight	单株籽粒重/g Grain weight per plant
拔节期 Jointing stage	45%FWC	WT	77.0±1.0d	10.7±0.8d	12.8±1.9e	37.7±5.4f	20.0±0.2g	0.88±0.045gh
		HA	80.0±1.1d	11.0±1.1cd	17.5±1.3ab	42.6±7.5def	24.2±0.5d	0.98±0.024e
	75% FWC	WT	92.3±5.5ab	12.3±1.4ab	14.7±2.1d	49.1±12.1de	25.8±0.4c	1.08±0.021d
		HA	92.7±4.7a	13.3±1.9a	15.2±1.9d	57.5±18.0bc	29.9±0.2a	1.22±0.025ab
抽穗期 Heading stage	45% FWC	WT	85.3±1.5c	11.8±1.6bc	12.7±1.5e	37.6±15.1f	21.7±0.4f	0.85±0.004h
		HA	85.7±3.2c	12.8±1.4ab	15.6±1.9cd	43.7±10.4def	25.7±0.4c	0.96±0.056ef
	75% FWC	WT	93.0±1.0a	12.8±2.0ab	16.9±1.8bc	50.8±9.7cd	22.8±0.8e	1.13±0.046cd
		HA	94.0±3.5a	13.3±1.0a	17.9±1.9ab	64.3±16.1b	24.7±0.4d	0.22±0.04a
灌浆期 Grain-filling stage	45% FWC	WT	88.0±2.0bc	11.9±1.2bc	15.0±2.2d	38.3±7.2f	22.0±1.0ef	0.78±0.024i
		HA	90.3±0.6ab	12.7±1.3ab	17.0±1.7bc	42.1±10.1ef	22.8±0.9e	0.92±0.023fg
	75% FWC	WT	92.3±0.6ab	12.2±1.2ab	18.1±2.9ab	59.7±20.6bc	23.9±0.4d	1.17±0.031bc
		HA	92.3±2.1ab	12.4±1.9ab	18.7±0.6a	67.3±16.9a	29.0±0.3b	1.23±0.04a
水分 Water (W)			** *	** *	** *	** *	** *	** *
喷施 Spraying (S)			ns	**	** *	**	** *	** *
处理时期 Treatment stage (T)			** *	*	** *	**	** *	ns
W×S			ns	ns	** *	*	ns	ns
W×T			** *	**	** *	**	** *	** *
S×T			ns	ns	ns	ns	**	ns
W×S×T			ns	ns	ns	ns	** *	ns
CV/%			3.08	5.20	5.68	12.56	2.19	3.13
Pr>F			<0.0001	0.0006	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

注:同列数字后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in each column indicate difference significant ($P<0.05$).

节期、抽穗期和灌浆期喷施 HA, 燕麦千粒重分别较喷施 WT 提高 21.2%、18.3% 和 8.4%, 而在 75% FWC 处理下, 喷施 HA 较喷施 WT 分别提高 16.0%、8.2% 和 21.0%。

在拔节期、抽穗期和灌浆期 45% FWC 处理下, 燕麦单株籽粒重分别较 75% FWC 下降 20.8%、23.1% 和 24.9% (表 3, $P<0.05$)。喷施 HA 可一定程度提高燕麦的单株籽粒重, 75% FWC 条件下, 在拔节期、抽穗期、灌浆期喷施 HA 分别较喷施 WT 提高 6.4%、8.3% 和 5.2%; 而 45% FWC 处理下, 喷施 HA 分别较喷施 WT 提高 10.5%、12.7% 和 4.6%, 在拔节期和抽穗期喷施 HA, 其产量提高幅度更大。

3 讨论

腐植酸肥料作为一种新型肥料, 已在各种作物上广泛应用, 并证实了其具有促进作物生长、缓解逆境胁迫的功能^[15]。然而不同生育时期的水分胁迫对作物生长及产量形成的影响是不同的^[16]。本试验喷施 HA 处理可显著提高燕麦叶片叶绿素相对含量, 该结果同赵海燕等^[10]、张春明等^[17]在小麦上所得结果一致, 此外, Bulgari 等^[18]也认为 HA 具有促进叶绿素合成和植株生长作用。本研究在 3 个生育

时期喷施 HA 后, 叶片 SPAD 值在水分胁迫下的提高幅度均大于正常供水条件。同时喷施 HA 还提高了水分胁迫下燕麦的叶面积, 且与产量构成因素相关性显著 (表 4), 从光合能力和光合面积两个方面促进燕麦生长, 为进一步燕麦籽粒产量形成提供物质基础。

水分胁迫下植物体内自由基产生和清除的平衡被打破, O_2^- 、 H_2O_2 等活性氧积累, 导致植物细胞受到伤害^[19], 并导致丙二醛 (MDA) 等脂膜过氧化产物大量积累^[20]。植物会启动体内抗氧化酶系统来清除活性氧, 防御自由基氧化损伤^[21]。其中, 超氧化物歧化酶 (SOD) 将体内 O_2^- 消除并转化 H_2O_2 的关键酶, H_2O_2 则进一步由过氧化物酶 (POD) 等多种酶清除并转化为 H_2O 和 O_2 ^[20]。许多研究发现喷施 HA 可明显提高小麦等作物体内 SOD 活性, 降低叶片 MDA 含量^[10, 17]。王娟等^[22]发现腐植酸处理下鸡冠花幼苗 SOD 等保护酶活性提高, 减缓了水分胁迫造成的伤害。本研究水分胁迫下喷施 HA, 叶片 POD 活性显著升高, 且抽穗期升高幅度最大; MDA 含量显著下降, 且在拔节期下降幅度最大, 抽穗期次之。以上结果说明在抽穗期喷施 HA 可能通过清除植物体内过量的自由基或减轻脂膜过氧化作用, 从而增强该生育时期植株适应水分胁迫的能力。

表 4 不同水分胁迫与腐植酸处理下各产量构成因素间相关性分析

Table 4 Correlation analysis of yield components indices in oat under water stress and humic acid foliar fertilizer treatments

指标 Index	单株小穗数 Spikelet number per plant	单穗粒数 Grain number per ear	千粒重 Thousand kernel weight	单株籽粒重 Grain-weight per plant
叶面积 Leaf area	0.77 ***	0.57 ***	0.34 *	0.41 *
株高 Plant height	0.51 ***	0.54 ***	0.43 **	0.64 ***
穗长 Panicle height	0.31 ns	0.31 ns	0.47 ***	0.46 ***
单株小穗数 Spikelet number per plant		0.66 ***	0.39 *	0.57 ***
单穗粒数 Grain number per panicle	0.66 ***		0.56 ***	0.77 ***
千粒重 Thousand kernel weight	0.39 *	0.56 ***		0.69 ***
单株籽粒重 Grain weight	0.57 ***	0.77 ***	0.69 ***	

脯氨酸(Pro)是细胞质中重要的渗透调节物质,在逆境胁迫下能保护细胞膜和原生质的稳定性,降低细胞渗透势,提高保水力^[23]。很多研究发现,植物在水分胁迫下 Pro 含量会升高^[23-25],本研究中 3 个生育时期水分胁迫下 Pro 含量升高,且升高幅度随生育期推进呈下降趋势。刘伟等^[26]研究发现,在中度和重度水分胁迫下喷施 HA 燕麦叶片 Pro 含量升高;本研究中 3 个生育时期喷施 HA,正常供水和水分胁迫下燕麦叶片的 Pro 含量均上升,且水分胁迫下 Pro 含量显著高于正常供水处理,在抽穗期达到最大,说明抽穗期喷施 HA 促进了燕麦 Pro 积累从而增强其抗旱性。然而,Khorasaninejad 等^[24]等在黄雏菊叶片、庞春花等^[27]在藜麦根系中发现,水分胁迫下喷施 HA 后植株的 Pro 含量出现下降。结果出现差别主要原因可能有以下两方面,一是由于设置胁迫时间或程度不同导致的,胁迫时间越长、程度越重,HA 促进 Pro 含量升高的程度可能越高。二是栽培条件不同,Khorasaninejad 等、庞春花等研究是在大田栽培条件进行的,而刘伟等与本研究均是盆栽试验,有限的土壤水分促使根系 ABA 信号快速传导至地上部,而 ABA 作为 Pro 积累的重要信号物质^[28],使地上部叶片的 Pro 含量上升。

不同生育时期水分胁迫会不同程度影响作物产量器官生长发育,最终影响产量^[2]。Moghadam 等^[29]研究发现,喷施 HA 对水分胁迫下增加玉米产量效果显著,可缓解由于干旱带来的伤害。然而也有报道发现 HA 对作物的养分吸收和产量并没有促进作用^[30-31]。本研究发现水分胁迫下拔节期喷施 HA,燕麦小穗数显著增加,而抽穗期喷施 HA 后穗粒数和千粒重均大幅度提高,并且这两个生育时期喷施 HA 处理燕麦单株粒重提高幅度均超过 10% (表 3);而在正常供水处理下,喷施 HA 后单穗粒数显著增加,小穗数和千粒重增加幅度较小,且在抽穗期单株粒重增幅达到最大,而该时期正是燕麦穗

粒数形成的关键时期^[32],说明抽穗期喷施 HA 能促进穗部籽粒发育,进而提高籽粒产量。相关性分析结果表明(表 4),单株粒重与穗粒数的相关性最大($r=0.76, P<0.001$),其次为千粒重和小穗数($r=0.69$ 和 $0.57, P<0.001$)。本研究在灌浆期喷施 HA 对燕麦籽粒产量形成的影响均明显弱于其他两个生育时期,可能是由于此时燕麦已经过了生长旺盛阶段,HA 发挥作用时间较短,使得其增产效果不明显。

综上所述,拔节和抽穗期水分胁迫下喷施 HA 可显著改善叶片光合能力、提高抗氧化酶活性和渗透调节能力,进而促进籽粒生长发育并提高产量。在实际生产中,水分胁迫条件下喷施 HA 的最佳时期是拔节期和抽穗期,正常水分条件下喷施 HA 的最佳时期是抽穗期。

参 考 文 献:

- [1] Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul H P. Management of crop water under drought: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2):401-442.
- [2] Kadam N N, Xiao G, Melgar R J, et al. Chapter Three-Agronomic and physiological responses to high temperature, drought, and elevated CO₂ interactions in cereals [J]. *Advances in agronomy*, 2014, 127: 111-156.
- [3] Marshall A, Cowan S, Edwards S, et al. Crops that feed the world 9. Oats- a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. *Food Security*, 2013, 5(1):13-33.
- [4] 任长忠, 胡跃高. 中国燕麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 1-23.
- [5] Al-Tabbal J A, Abu-Darwish H H, Alhrouf H S, et al. Response of onion (*Allium cepa*) crop to foliar application of humic acid under rain-fed conditions [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20(5):1235-1241.
- [6] Barekati F, Hervan E M, Shirani Rad A H, et al. Effect of sowing date and humic acid foliar application on yield and yield components of canola cultivars [J]. *Tarim Bilimleri Dergisi-Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 25(1):70-78.
- [7] Olk D C, Dimnes D L, Scoresby J R, et al. Humic products in agriculture: potential benefits and research challenges-a review [J]. *Journal*

- of Soils and Sediments, 2018, 18(8):2881-2891.
- [8] Nardi S, Ertani A, Francioso O. Soil-root cross-talking: The role of humic substances [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2017, 180(1):5-13.
- [9] Abdelal K A A, Hafez Y M, El-Afry M M, et al. Effect of some osmo-regulators on photosynthesis, lipid peroxidation, antioxidative capacity, and productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30):30199-30211.
- [10] 赵海燕, 甘淳丹, 兰汝佳, 等. 喷施新型腐殖酸型叶面肥对小麦旗叶抗氧化和产量及品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(4): 685-690.
- [11] Kaya C, Akram N A, Ashraf M, et al. Exogenous application of humic acid mitigates salinity stress in maize (*Zea mays* L.) plants by improving some key physico-biochemical attributes [J]. Cereal Research Communications, 2018, 46(1):67-78.
- [12] Lotfi R, Kalaji H M, Valizadeh G R, et al. Effects of humic acid on photosynthetic efficiency of rapeseed plants growing under different watering conditions[J]. Photosynthetica, 2018, 56(3):962-970.
- [13] 张志芬, 付晓峰, 赵宝平, 等. 腐植酸对重度干旱胁迫下燕麦叶片可溶性糖组分和内源激素的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 11-20.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:208-231.
- [15] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065-1076.
- [16] Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul H-P. Management of crop water under drought: a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2):401-442.
- [17] 张春明, 兰汝佳, 甘淳丹, 等. 新型微量元素型叶面肥对春小麦旗叶衰老、籽粒产量和品质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1): 121-127.
- [18] Bulgari R, Cocetta G, Trivellini A, et al. Biostimulants and crop responses: a review[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2015, 31(1):1-17.
- [19] De Campos M K F, De Carvalho K, De Souza F S, et al. Drought tolerance and antioxidant enzymatic activity in transgenic 'Swingle' citrumele plants over-accumulating proline[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 72(2):242-250.
- [20] Shahzad M A, Jan S U, Afzal F, et al. Drought stress and morpho-physiological responses in plants [C]//Ahmad P. Water Stress and crop plants. UK: John Wiley & Sons, Ltd: 2016:452-467.
- [21] Ghobadi M, Taherabadi S, Ghobadi M-E, et al. Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to drought stress[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 50:29-38.
- [22] 王娟, 何平, 张春平, 等. 外源 NO 供体硝普钠、甜菜碱、腐植酸对干旱胁迫下鸡冠花幼苗生理指标的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(4):14-21.
- [23] Dien D C, Mochizuki T, Yamakawa T. Effect of various drought stresses and subsequent recovery on proline, total soluble sugar and starch metabolisms in Rice (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. Plant Production Science, 2019, 22(4):530-45.
- [24] Khorasaninejad S, Áalizadeh Ahmadabadi A, Hemmati K. The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 239:314-323.
- [25] Man D, Bao Y X, Han L B, et al. Drought tolerance associated with proline and hormone metabolism in two tall fescue cultivars[J]. HortScience, 2011, 46(7):1027-1032.
- [26] 刘伟, 刘景辉, 萨如拉, 等. 腐植酸水溶肥料对燕麦叶片保护酶活性和渗透物质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 107-109.
- [27] 庞春花, 贺笑, 张永清, 等. 氮肥与腐殖酸配施对藜麦根系抗旱生理效应及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 184-188.
- [28] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(1):185-212.
- [29] Moghadam H R T, Khamene M K, Zahedi H. Effect of humic acid foliar application on growth and quantity of corn in irrigation withholding at different growth stages[J]. Maydica, 2014, 59(1-4):125-129.
- [30] Hartz T K, Bottoms T G. Humic substances generally ineffective in improving vegetable crop nutrient uptake or productivity[J]. HortScience, 2010, 45(6):906-910.
- [31] Ahmad W, Shah Z, Khan F, et al. Maize yield and soil properties as influenced by integrated use of organic, inorganic and bio-fertilizers in a low fertility soil[J]. Soil & Environment, 2013, 32(2):121-9.
- [32] Finnan J M, Spink J. Identification of yield limiting phenological phases of oats to improve crop management[J]. The Journal of Agricultural Science, 2017, 155(1):1-17.